第 41 卷　第 1 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 1
2023 年 3 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Mar., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.01.04

M31 中天体的光谱观测与研究

张湘玮[1]，孙佳蕊[1]，陈品健[1]，陈丙秋[2]

(1. 云南大学 物理与天文学院，昆明 650500；2. 云南大学 中国西南天文研究所，昆明 650500)

摘要： 仙女星系 (M31) 是距离地球最近的大型旋涡星系，与银河系结构相似且质量相当，对 M31 天体的光谱观测与研究有助于理解银河系以及一般星系的形成与演化历史。整理了自 20 世纪以来天文学家对 M31 中天体的相关光谱观测与研究成果，共涉及了 M31 中 5 000 余个发射线天体、2 000 余个星团、6 000 余颗恒星、1 000 余颗新星以及核球和盘上的星族的光谱。恒星光谱观测由早期的以超巨星为主发展到近 20 年更大样本以及更多类型，其中红巨星被用于研究 M31 星系盘和晕的性质及子结构。发射线天体通常被应用于 M31 质量测定、运动学分析和恒星演化的研究。M31 星团的研究集中于金属丰度和运动学性质，以及利用视向速度测定 M31 位力质量。对 M31 中心星族的研究主要集中于核区的星族组成和运动学分析，其中运动学研究结果更支持核区的偏心盘模型。最后，介绍了郭守敬望远镜对 M31 天体的光谱观测与相关科学研究。

关　键　词： 光谱观测；M31 (仙女星系)；运动学与动力学；丰度；星族

中图分类号： P157.2　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

可观测宇宙存在大量星系，但只有本星系群中数十星系的星族组成可以被解析为单体并在空间、速度、金属丰度等多维相空间里进行细致研究。作为本星系群中质量最大的成员，M31 是距离我们最近的大型旋涡星系，在结构性质方面，M31 与银河系存在许多相似之处，是我们研究星系形成与演化的绝佳目标。

天体的光谱中蕴含大量天体自身的物理信息。随着近年来国内外多个针对 M31 中天体光谱观测项目的开展[1–4]，我们获得的 M31 中天体光谱的数量急剧增长，已在多个研究方向中取得了重要的科研成果，如利用光谱进行天体分类，证认得到 M31 中大量行星状星云 (planet nebula, PNe)[2, 3, 5]、球状星团 (globular cluster, GC)[6–9]、超巨星[10–12]、电离氢

收稿日期： 2022-04-22；　**修回日期：** 2022-07-30

资助项目： 云南大学创新创业训练项目 (202110673079)；国家自然科学基金委 (11803029)

通讯作者： 张湘玮，zhangxw@mail.ynu.edu.cn

区[13−15] 等特殊天体，并以这些天体作为探针研究 M31 动力学与化学性质，深入了解 M31 的结构以及形成和演化历史等[16−20]。

本文整理了国内外对 M31 中天体的光谱观测及其研究成果。文章结构如下：第 2 章和第 3 章分别介绍了早期和近 20 年 M31 中天体的光谱观测研究，第 4 章单独介绍我国郭守敬望远镜 (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)[4] 对 M31 中天体的光谱观测，第 5 章进行总结与展望。

2 早期 M31 中天体的光谱观测与研究

在本章中，我们将首先回顾早期 (截止于约 2000 年) 对 M31 中天体的光谱观测与研究。M31 距离我们约 780 kpc[21]，星系中一些较亮的天体可以被单独区分并进行光谱观测。由于设备与观测条件的限制，早期对 M31 中天体的光谱观测较为困难，得到的光谱数量较少、质量不高。相关研究工作如天体的证认以及星系性质研究等都处于起步阶段，如表 1 所列。

表 1 早期 M31 中天体的光谱观测信息

年份	光谱仪/望远镜	光谱范围	分辨率/Å	信噪比	研究内容	参考文献
1979	KPNO 2.1 m, 4 m①	0.8∼1.2 mm	5.5	—	超巨星证认	[22]
1988	IDS/UM-UCSD②	6 000∼8 800 Å	8	较低	红超巨星证认	[24]
1992	FOS/HST③	1 087∼3 301 Å	5, 0.9	8∼9	证认 O 型、WR 星	[25]
1998	KPNO 4 m, WIYN 3.5 m④, MMT⑤	—	3.0∼3.5	30∼50	测光证认方法检验	[26]
1983	MMT	3 800∼6 800 Å	8	—	WR 星证认	[27]
1987	MMT	3 800∼6 800 Å	8	≃30	WR 星性质研究	[28]
1990, 1992	FOS/WHT⑥	3 500∼9 700 Å	7	—	WR 证认与光谱型	[30, 31]
1986, 1987	MMT	3 000∼7 500 Å	4	较低	WR 证认与光谱型	[29, 33]
1999	OAN SPM 2.1 m⑦	—	4.5, 6∼7	4	WC6 星及星周云	[32]

注：① KPNO 2.1 m, 4 m，基特峰国家天文台 (Kitt Peak National Observatory) 2.1 m, 4 m 望远镜；② IDS/UM-UCSD，Image-Dissector Scanner/明尼苏达大学-加州大学圣地亚哥分校 1.5 m 望远镜 (University of Minnesota/University of California, San Diego 1.5 m Telescope)；③ FOS/HST，暗弱天体摄谱仪 (Faint Object Spectrograph)/哈勃太空望远镜 (Hubble Space Telescope)；④ WIYN 3.5 m，威斯康星-印第安-耶鲁-国家光学红外天文学研究实验室 3.5 m 望远镜 (Wisconsin-Indiana-Yale-NOIRLab 3.5 m Telescope)；⑤ MMT，多镜面望远镜 (Multiple Mirror Telescope)；⑥ FOS/WHT，暗弱天体摄谱仪 (Faint Object Spectrograph)/威廉·赫歇尔望远镜 (William Herschel Telescope)；⑦ OAN SPM 2.1 m，墨西哥国家天文台 (Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir) 2.1 m 望远镜。

2.1 恒星

在对 M31 中恒星的光谱观测与证认工作中，大多数都是先由测光结果得到候选体，再通过后续光谱观测证认并得到其光谱型。除恒星光谱型的识别以外，还利用光谱分析辅助判

断目标恒星是否为 M31 的成员。

由于 M31 距离遥远，能在早期进行光谱观测的恒星一般只有超巨星。1979 年，Humphreys[22] 在基特峰国家天文台 (Kitt Peak National Observatory, KPNO) 的 2.1 m 和 4 m 望远镜上获得了 14 颗超巨星候选体的光谱，并证认出其中 5 颗超巨星的光谱型，对 Baade 和 Swope[23] 的测光结果做了很好补充。随后他们又对测光数据得到的 45 颗红色恒星进行光谱观测，得到了23 颗可能的M型红超巨星[24]。Massey[26] 利用来自 KPNO 4 m 望远镜的 130 颗恒星光谱对红超巨星测光证认方法进行了检验，并认为该方法具有高度的正确性。

对 M31 中沃尔夫-拉叶星 (Wolf-Rayet star, WR 星) 的光谱研究开始于 20 世纪 80 年代，它们是早期巨星证认的重点。WR 星是大质量宽发射线的一类恒星，He 线强而 H 线较弱，可根据光谱分为 WN (N 序)、WC (C 序) 和 WO (含 O 发射线) 三类。Moffat 和 Shara 首先证认出 M31 的 3 颗 WN 星和 14 颗 WC 星[27]，并进一步分析了这些恒星的物理性质[28]。1986 年，Massey 等人[29] 证认出 4 颗晚型 WC 星和一颗早型 WN 星。20 世纪 90 年代，Schild 等人利用威廉·赫歇尔望远镜进行了一系列光谱研究，对文献中的 6 颗 WR 星进行了光谱分类[30]，还新发现了一颗 WC4-5 星和一颗 WC7-8 星[31]。1999 年 Greiner 等人也通过光谱新证认了一颗 WR 星[32]。这些光谱研究发现，相比于本星系群的其他星系，M31 所含的 WR 星较少[29, 33]，且集中分布于 M31 的恒星形成环中[27, 28, 34]。

2.2　发射线天体

发射线天体包含了 PNe，电离氢区以及超新星遗迹 (supernova remnant, SNR) 等天体。这些天体辐射出很强的电离气体发射线，容易被光谱观测证认。首个对 M31 运动学性质进行大规模研究的是 Babcock 于 1939 年的工作。这项工作使用利克天文台 Crossley 望远镜的双棱镜星云光谱仪观测了 M31 中心部分的发射线星云[45]。1993 年，Meyssonnier 等人[34] 对 M31 中的发射线天体进行了大规模观测，得到了一个包含 1 515 个发射线天体源的星表，其中大部分为新发现的天体。表中多数为 PNe，也存在少数电离氢区和 WR 星。

M31 中发射线天体是研究 M31 运动学性质的重要探针，可用于测量 M31 的质量。1970 年，Rubin 和 Ford[46] 获得了 M31 中 3 ~ 24 kpc 距离区间的 67 个电离氢区的光谱，并首次绘制了较可靠的 M31 的旋转曲线，得到了其质量分布。电离氢区一般分布在星系内部；而更远半径处只存在中性气体和低亮度恒星，光学光谱探测极为困难，只能通过中性氢的 21 cm 射电谱测量视向速度。1975 年，Roberts 和 Whitehurst[47] 利用这一方法将质量信息由 24 kpc 扩展到 30 kpc 处。随后 Kent[48] 也证实了两种探针的相容性。

2.3　星团

早期对 M31 中星团的证认与研究主要是针对球状星团 (GC)，GC 亮度高，从其积分光谱中可以获取视向速度、金属丰度与年龄等信息，进而进行 M31 的运动学与化学性质和星系历史研究。早期主要光谱研究累计获得了 500 多个 M31 中 GC 及候选体的光谱[35, 36]。另有一些大质量年轻星团在早期也被认为是 GC。

使用 GC 作为探针可以测定星系质量。1969 年，Van den Bergh[37] 对 44 个 M31 中 GC 进行了光谱观测。基于这些数据，Hartwick 和 Sargent[38] 使用位力定理方法测定了 M31 的

质量，并进一步发现贫金属 GC 比富金属 GC 具有更大的速度弥散。Federici 等人[39]新观测了 31 个 M31 中的 GC，并结合 Sargent 等人[40] 和 Battistini 等人[41]的数据估计了 M31 的投影质量。1993 年，Federici 等人[42]证认了 35 个 GC 候选体并观测得到了其中 21 个已证认 GC 的视向速度，再次计算了 M31 的投影质量。

就 GC 的金属丰度和颜色分布而言，早期研究发现 M31 与银河系的 GC 系统有着类似的特征[35, 36]。Barmby 等人[35]发现 M31 中 GC 的金属丰度分布与银河系类似，具有双峰结构，且颜色与金属丰度存在正相关关系。Huchra 等人的两项 M31 的 GC 光谱观测表明，GC 的金属丰度与其投影距离 (天体到 M31 中心的距离在 M31 盘面上的投影) 有着弱相关关系[43, 44]。但是，Crampton 等人[36]没有发现 M31 中 GC 颜色与投影距离的相关关系。

2.4 M31 中心星族

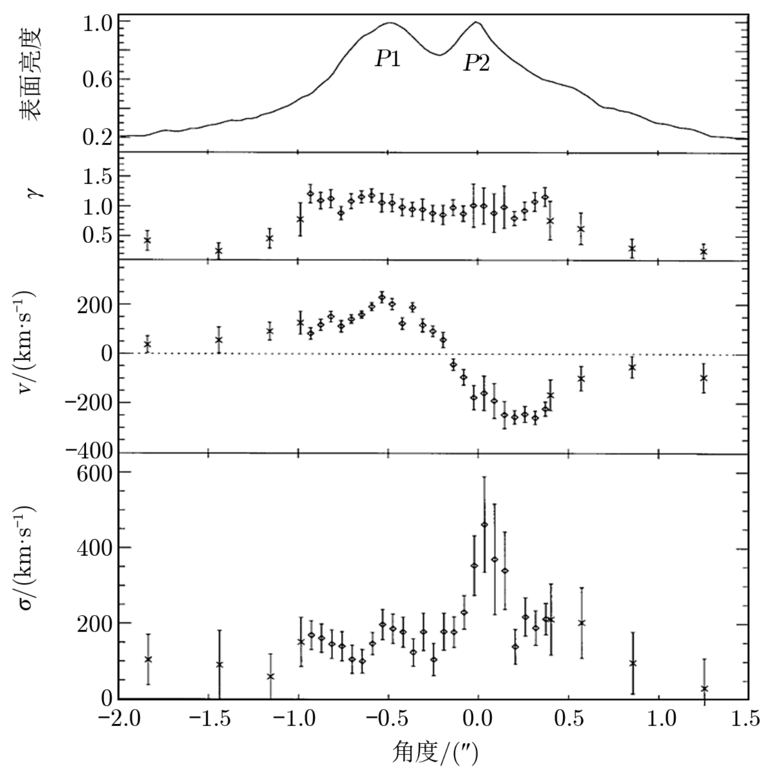
M31 是继银河系之后第二个被发现存在超大质量黑洞的星系。通过对哈勃望远镜数据的研究，M31 核区面亮度具有双峰结构，其中较亮的峰为 P1，次亮峰为 P2[49]。关于 M31 的 P1、P2 与中心黑洞，存在两个理论模型，Emsellem 和 Combes[50]认为 P1 是一个致密的星团，处在被中心黑洞潮汐瓦解的边缘，且绕着黑洞中心 P2 旋转；Tremaine[51]认为 P1 不是一个动力学上的引力束缚系统，而是统计上绕 P2 内黑洞的恒星的累计，M31 中心的双核结构实际上是由绕黑洞旋转的恒星所组成的一个偏心盘。

通过光谱研究，我们得以了解核区的动力学信息，进而推出超大质量黑洞的性质。图 1 显示了由光谱获得的核区的面亮度以及动力学信息。

1994 年，Bacon 等人使用加拿大-法国-夏威夷望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT) 中的集成视场摄谱仪，对核区进行了二维光谱分析，发现 M31 核区的旋转极其快速，且速度弥散峰偏离了运动学中心[52]。1999 年，Statler 等人[53]使用哈勃望远镜暗弱天体照相机 (Faint Object Camera) 中的长狭缝光谱仪 (f/48 Long-slit Spectrograph)，发现速度零点在 P1 和 P2 间，距离 P2 约 0.16″；速度弥散的峰值 (440 $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$) 位于 P1-P2 的延长线上，距离 P2 约 0.06″。Statler 等人将数据用于评估上述两个模型，发现如果将模型中心黑洞的质量增加 10%，Tremaine 的模型[51]能更好地匹配数据。Kormendy 和 Bender[54]使用 CFHT 的亚角秒成像光谱仪 (Subarcsecond Imaging Spectrograph, SIS) 获得了 M31 核区星族的积分场光谱 (Integral Field Unit, IFU)，以此计算了核区恒星的运动特征及金属丰度，并得到了非参数形式的视向速度分布和中心黑洞质量的估值，质量结果与 Tremaine 的模型[51]相符合，再次验证了 M31 的偏心盘模型。

3 近 20 年来对 M31 中天体的光谱观测与研究

随着望远镜仪器设备的更新发展，近 20 年来 (约 2000 年以后)，对 M31 中天体的光谱观测与研究有了长足的进步与发展。表 2 总结了相关的研究工作。



注：顶部的图显示了 M31 核区的近似表面亮度分布，第二张图显示线强度参数 γ (非线强度实际测量值分布)，第三张和第四张图显示了旋转曲线和速度弥散曲线。菱形符号代表已利用 γ 加权平均的最佳数据，十字符号表示由于系统误差而未加权的数据。

图 1　核区面亮度和动力学信息[53]

表 2　近 20 年来 M31 中天体的光谱观测信息

年份	光谱仪/望远镜	光谱范围 /Å	分辨率 /Å	信噪比	研究内容	参考文献
2006, 2009	DEIMOS/Keck II①	6 450~9 900	**≃1.2**	—	SPLASH	[16, 61]
2004	Hydra/WIYN	4 800~6 800	2.9	—	PNe 动力学	[82]
2006	PN.S/HST	≃5 002.2	—	—	PNe 证认	[3]
2006	WYFFOS/HST	4 808~5 158	0.9,0.5	—	PNe 证认	[2]
2012	DIS/ARC 3.5 m, Gemini N②	3 600~9 600	≃7	—	PNe 金属丰度	[87]
2013, 2015, 2021	OSIRIS/GTC	3 700~7 850	6.3	—	PNe 详细丰度	[5, 89–91]
2014	CAFOS/CAO 2.2 m③	4 200~6 800	4~6	33.3	PNe 搜寻	[84]
2013	DS/Hale 5.1 m④	3 400~7 300	2.4	—	子结构	[92]
2012	Hectospec/MMT	3 650~9 200	5	—	化学演化	[13]
2009, 2011	Hectospec/MMT	3 650~9 200	5	60, 30	星团	[7, 98]
2017	SITELLE/CFHT	6 470~6 850	**≃1.3**	—	视向速度表	[94]

(续表)

年份	光谱仪/望远镜	光谱范围 /Å	分辨率 /Å	信噪比	研究内容	参考文献
2002	WYFFOS/WHT	3 700~5 600	2.5	—	GC 金属丰度	[19]
2006	WYFFOS/WHT	4 000~5 700	2.2	—		
2007,	BFOSC/G.B. Cassini	4 200~6 600	4.1	8		[6, 95, 96]
2009	DoLoRes/TNG⑤	3 800~6 800	6	13	GC 证认	
2007	Hydra/WIYN	400~6 600	7.07	6~10	GC 证认	[97]
2016	APOGEE/APO	3 000~9 000	**0.27**	7.99~65.72	GC 详细丰度	[9]
2013, 2014	RC/KPNO 4 m⑥	3 500~6 500	**3.85**	7~70		[100, 101]
2013, 2014	ISIS/WHT	3 500~9 200	4.23, 2.35	25~50	GC 动力学	[100, 101]
2014	GMOS/Gemini N	7 450~9 500	**2.11**	15	GC 动力学	[101]
2001	ISIS/WHT	3 640~9 277	0.8			[115]
2001	HIRES/Keck I⑦	6 530~6 630	**0.19**			[115]
2001	STIS/UV	112~1 716	1.5	5~50	OB 星、WR 星	[115]
2008	DEIMOS/Keck	3 500~9 000	**1.89**	150	超巨星	[10]
2012	Hectospec/MMT	3 700~9 000	6	100~150	WR 星证认	[116]
2009	Hectospec/MMT	4 550~7 050	2.8	—	黄超巨星	[11]
2013, 2016, 2017	Hectospec/MMT	3 550~7 050	**2.64, 1.47**	—	亮星、变星	[12, 112, 114]
2007	Hydra/WIYN	3 970~7 400	1.5, 3.4	—	LBV 候选体	[108]
2016	Hectospec/MMT	3 650~9 200	5	—	OB 星	[109]
2015	SPRAT/LT⑧	5 000~7 500	18	—	M31N2015—01a	[119]
2015	SCORPIO/BTA	4 050~5 850	**4.95**	—	M31N2015—01a	[120]
2005	STIS/HST⑨	2 900~8 845	—	最大 25	核区	[125]
2018	Hydra/WIYN	4 119~6 882	3.35	—	核区 PNe	[14]
2011, 2012	OMR/Xinglong 2.16 m⑩	3 500~8 100	4	⩾40	GC 金属丰度	[8, 99]

注：表中用黑体字表示的是由 R 计算的中心波长处的分辨率。① DEIMOS/Keck II，深度成像多目标光谱仪 (DEep Imaging Multi-object Spectrograph)/凯克 II 望远镜；② DIS/ARC 3.5 m，Gemini N，双成像光谱仪 (Dual Imaging Spectrograph)/天体物理学研究联盟 3.5 m 望远镜(Astrophysical Research Consortium 3.5 m Telescope)，双子座北面望远镜 (Gemini North)；③ CAFOS/CAO 2.2 m，卡拉阿托暗弱天体光谱仪 (Calar Alto Faint Object Spectro-graph)/卡拉阿托天文台(Calar Alto Observatory 2.2 m Telescope)；④ DS/Hale 5.1 m，双光谱仪 (Double Spectro-graph)/帕洛玛山天文台 5.1 m 海尔望远镜 (Palomar Observatory 5.1 m Hale Telescope)；⑤ WYFFOS/WHT, BFOSC/G.B. Cassini, DoLoRes/TNG，宽视场光纤光谱仪 (Wide Field Fibre Optic Spectrograph)/威廉·赫歇尔望远镜, 低分辨率光谱仪 BFOSC (Low-resolution Spectrograph BFOSC)/G. B. 卡西尼望远镜 (G. B. Cassini Telescope)，成像仪或光谱仪 (Imager or Spectrograph DoLoRes)/伽利略国家望远镜 (Telescopio Nazionale Galileo)；⑥ RC/KPNO 4 m，里奇-克雷蒂安光谱仪 (Ritchey-Chretien spectrograph)/基特峰国家天文台 4 m 梅奥尔望远镜 (Kitt Peak National Observatory 4 m Mayall Telescope)；⑦ HIRES/Keck I，高分辨率阶梯光栅光谱仪 (High-Resolution Echelle Spectrograph)/凯克 I 望远镜；⑧ SPRAT/LT，用于快速采集瞬态信号的摄谱仪 (SPectrograph for the Rapid Acquisition of Transients)/利物浦望远镜 (Liverpool Telescope)；⑨ STIS/HST，空间望远镜成像光谱仪 (Space Telescope Imaging Spectrograph)/哈勃望远镜 (Hubble Space Telescope)；⑩ OMR/Xinglong 2.16 m，OMR 卡焦光谱仪 (Optomechanics Research Inc. Spectrograph)/兴隆观测站 2.16 m 望远镜。

3.1 恒星

与 20 世纪相比，近 20 年来光谱观测到 M31 中恒星的数量和种类增长较快：观测得到了大量红巨星以及大质量主序星，超巨星的样本数量也在原有基础上增加了许多。

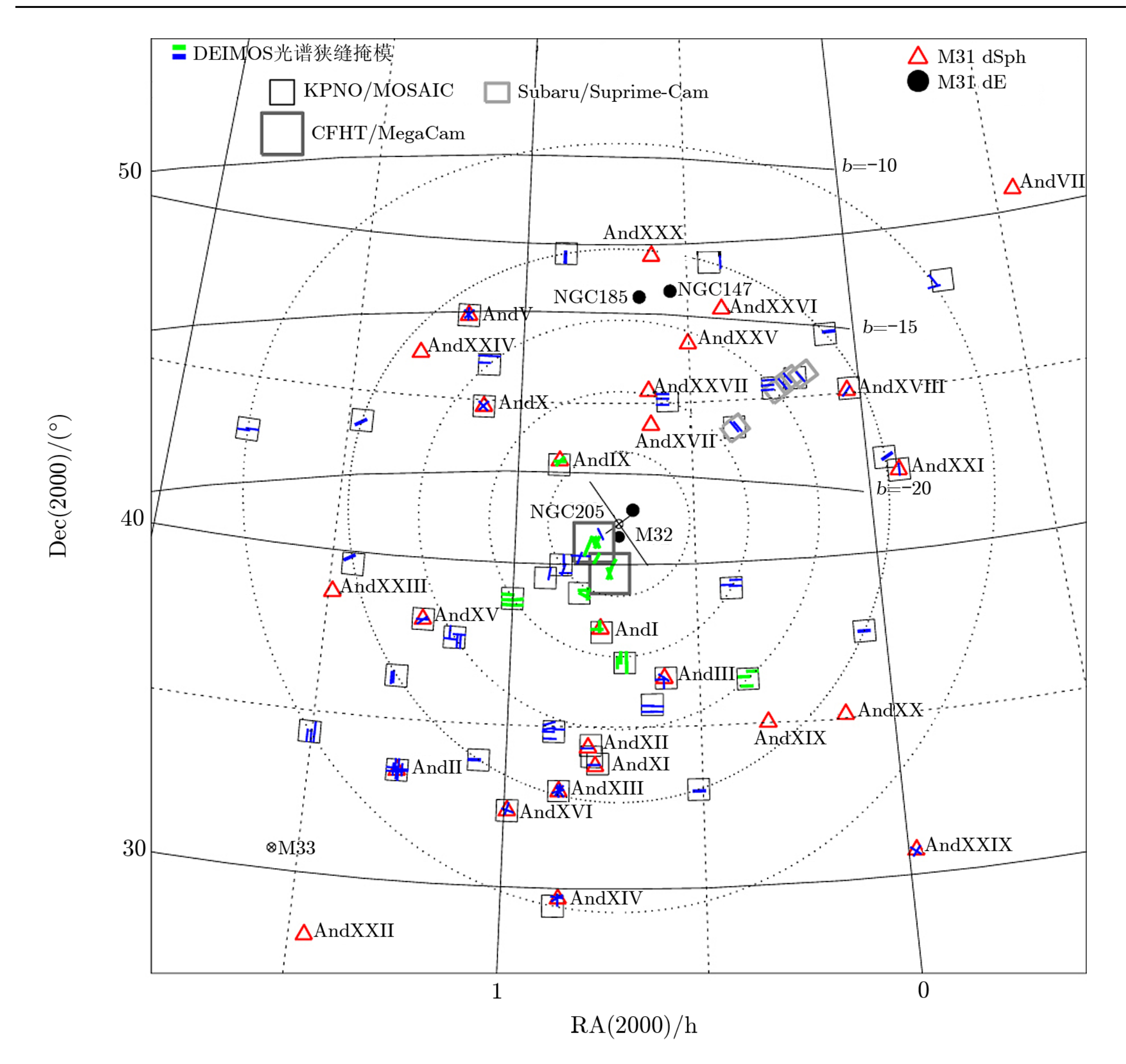
3.1.1 红巨星

红巨星被广泛用于研究星系晕的动力学、子结构和吸积历史。但是由于红巨星光度较低，早期研究所使用的望远镜不足以拍摄到红巨星光谱。即使到目前为止，大部分红巨星的光谱观测也基本借助于Keck这样的大型望远镜，所使用的光谱仪为 Keck I 望远镜上的低分辨率成像光谱仪 (Low Resolution Imaging Spectrometer, LRIS) 和 Keck II 望远镜的深度成像多目标光谱仪 (DEep Imaging Multi-Object Spectrograph, DEIMOS)。LRIS 光谱拍摄分红端和蓝端两部分，综合覆盖 $3\,200 \sim 10\,000$ Å，狭缝光谱跨度 $8'$。DEIMOS 建造年代晚于 LRIS，在各方面性能上都有了大幅度提升。DEIMOS 单次曝光即可覆盖 5 000 Å 的波长范围，分辨率 R 较高 ($R \simeq 6\,000$)，狭缝光谱跨度为 $16.6'$，且可以拍摄多狭缝光谱。

基于 Keck I 望远镜的 LRIS，Reitzel 和 Guhathakurta[1, 55]发表了距离 M31 中心 19 kpc 处的 14 个晕中红巨星候选体的红外光谱，测量了这些候选体的视向速度，结合光谱中 Ca II 三重线的等值宽度对 M31 晕星与银河系前景星进行了区分。Guhathakurta等人[56, 57]将 M31 中具有光谱观测的红巨星候选体样本增加到了 99 个，基于样本发现 M31 晕的恒星密度比银河系高一个数量级。基于 Keck 观测得到的 29 颗红巨星光谱数据，Reitzel 等人发现 M31 晕中红巨星与银河系晕中红巨星相比，金属丰度更高，且 M31 晕中红巨星的金属丰度分布与 M31 GC、银河系 GC、本星系群矮星系的分布都类似。样本中 4 颗红巨星具有特别强的 Ca II 三重线，在速度和金属丰度相空间中表现为可能的盘星或吸积事件中富金属的潮汐碎片[58]。Reitzel 等人还对 M31 中一个著名的球状星团 G1 附近的红巨星样本进行了光谱观测与研究，发现样本中红巨星的金属丰度分布范围很大 ($-2.8 <$ [Fe/H] < 0.0 dex)。其中贫金属的红巨星 ([Fe/H] < -1 dex) 速度分布比较弥散 ($-500 < v < 50$ km·s^{-1})，富金属的红巨星 ([Fe/H] $\simeq -0.7$ dex) 速度较为集中 (约 -480 km·s^{-1})。样本中 6 颗与 G1 运动学相关的红巨星可能是 G1 的潮汐碎片，其中 1 颗可能属于 G1[59]。

基于 Keck II 的 DEIMOS，Guhathakurta 团组提出了一个针对 M31 晕和盘中红巨星的 SPLASH (Spectroscopic Landscape of Andromeda's Stellar Halo) 项目。测光观测主要使用 KPNO 4 m 望远镜上的 Mosaic 相机，在宽带 M 和 T2 滤光片以及窄带 DDO51 滤光片上成像。光谱观测使用 Keck II 的 DEIMOS，截止 2017 年已在 170 个天区中获得了 20 000 多个 M31 的盘、晕以及矮星系的恒星光谱，投影距离为 $2 \sim 230$ kpc[60]。部分光谱和测光观测的场如图 2 所示。

SPLASH 的主要目的是通过描绘 M31 盘和晕的金属丰度分布与结构/子结构以及并合产生的碎片痕迹来研究晕的动力学性质[16, 61]，也对 M31 卫星星系的运动学、金属丰度、质量等问题进行了研究[62–65]。2006 年，Guhathakurta 等人[61]发布了 SPLASH 项目的初步结果，首批证认出了 68 颗 M31 中的红巨星；Guhathakurta 等人以此估计了 M31 巨型南部星流 (giant south stream, GSS[66]) 的视向速度与金属丰度。对非 GSS 红巨星的分析表明，晕



注：每个天区的位置和方向用一个小矩形表示；绿色矩形表示具有运动学识别子结构的天区；较大的矩形表示使用不同望远镜进行测光的天区。

图 2　SPLASH 光谱观测的视场的位置[71]

的金属丰度较低，或许存在新的子结构[61]。基于 SPLASH 数据，Kalirai 等人[67]提出了从银河系前景矮星中分离出 M31 红巨星的新方法，并识别出距离 M31 中心 12 ~ 165 kpc 的 530 颗红巨星。随着 SPLASH 项目的进行，项目观测的区域逐年增加，获得的红巨星光谱数量也随之增加[16−18, 68−70]。截止 2018 年，SPLASH 项目已经在 M31 的 50 个区域内证认出 5 000 余颗红巨星[71]。

基于 SPLASH 的数据，科学家在研究 M31 盘和核球运动学，M31 晕的子结构以及晕的化学动力学性质等领域取得了一系列新发现。Dorman 等人[17]发现，距离 M31 中心 20 kpc 内的类球体成分具有高恒星密度、高金属丰度的性质，这表明 M31 在 20 kpc 内更像是一

个椭圆星系，而不是典型的旋涡星系核球。Kalirai 等人[72]发现距离 M31 中心 20 kpc 处的红巨星的视向速度分布具有双峰性。Collins 等人[69]发现 M31 的厚盘比薄盘更贫金属，且相对于薄盘来说，厚盘存在运动学上的滞后。Ibata 等人[73]发现了一个低亮度的不均匀盘状结构，约占 M31 盘总光度的 10%，且具有较广的金属丰度范围。在 M31 晕子结构研究方面，M31 的西北长轴中发现了一个蓝色贫金属的弧状子结构，这可能是星流的一部分，前身属于 NGC 205[74]；而 M31 东南短轴上发现了一个运动学冷的恒星族群，可能起源于 GSS 的潮汐碎片[75]。此外，Ibata 等人发现 M32、NGC 205 与 GSS 在运动学上具有明显的相关性[76]。Gilbert 等人发现 M31 晕表面亮度分布遵循指数为 -2.2 ± 0.2 的幂律[70]，速度弥散随投影半径逐渐降低但幅度不大[71]。M31 晕存在弱金属丰度梯度[18, 67]，这与 M31 晕逐渐化学增长的星系形成模型[67]相吻合。相比于 M31 晕中的场星，各子结构的成员星具有更大的富金属丰度[16]。

3.1.2 大质量恒星

亮蓝变星 (luminous blue variable, LBV) 处于大质量恒星演化的晚期，亮度极高，是研究超大质量恒星演化的重要天体。2007 年，Massey 等人[108]使用 WIYN 3.5 m 望远镜，证认出 M31 中 12 个新的 LBV 候选体。2016 年，Massey 等人[109]对 M31 和 M33 的 1 895 颗恒星进行了光谱分类，证认出 9 个 LBV 候选体和一颗新的 WR 星。Sarkisyan 等人对 Massey 等人[108, 109]样本中两颗 LBV 候选体 (J004341.84+411112.0[110, 111]和 J004526.62+415006.3[110]) 进行了进一步的光谱观测与研究，证实了这两颗星为 LBV。2014 年，Humphreys 等人分析了 Massey 等人[108]样本中 82 颗恒星的光谱特征，发现 3 个新 LBV 候选体和 3 个新后红超巨星候选体；同时发现样本中来自 M31 的 LBV 并不像其他大多数变星和亮星那样拥有温度较高的星周尘，且 LBV 相较于 B 型超巨星和 Of/WN 星具有更小的星风风速[113]。已确认的 LBV 的光谱中均不含 [O I] 发射线，同时部分 LBV 存在 [Fe II] 发射线[114]。

OB 型星是光谱分类为 O 型和 B 型的大质量恒星，多分布于结构松散的 OB 星协中。2001 年，Smartt 等人[115]获得了 M31 星协 OB 10 中的两颗大质量恒星 (OB 10-64, B0 Ia 和 OB 10-WR1, WC6) 的高质量光谱数据，并进行了详细的定量分析，给出了 He, C, Ni 等元素的丰度和恒星参数。这是首个对 M31 B 型星和 WR 星进行大气化学分析的研究。2008 年，Cordiner 等人[10] 对 M31 星协 OB 78 周围两颗超巨星 MAG 63885 和 MAG 70817 进行低分辨率光谱观测与研究，检测到 M31 中 OB 星的星周气体弥漫吸收带 (diffuse interstellar band, DIB)。2011 年，他们又获得了 34 颗 M31 中 B 型星的光谱，得到了这些恒星的光谱分类、视向速度以及星际红化等参数。基于这些光谱数据，他们探测到 M31 中 11 个 DIB 特征[10]。

M31 中 WR 星的证认数量与光谱数据也在不断增加。2012 年，Neugent 等人[116]进行了大范围的 M31 中 WR 星搜寻与光谱证认，发现 107 颗新 WR 星，至此 M31 中光谱证认的 WR 星的数量达到 154 个。此次观测所得的大部分为 WN, WC 与 WN 的比率 (WC/WN) 比前人的研究低。Sander 等人[117]使用 Neugent 等人的数据，对当时已知所有的 17 个晚型 WN 进行了分析，发现所有恒星的光度都在 $10^5\ L_\odot \sim 10^6\ L_\odot$ 之间，还发现单星演化形成的晚型 WN 的初始质量范围为 $20\ M_\odot \sim 60\ M_\odot$。2016 年，Shara 等人[118]证认出 M31 中第一

颗 WN/C 的过渡型 WR 星，分析发现这颗 WN/C 被发射线星云所包围。

黄超巨星是光谱型为 F 型或 G 型的大质量恒星。根据恒星演化模型，大部分恒星从 OB 型主序阶段演化到红超巨星阶段时会短暂地经过黄超巨星阶段，因此黄超巨星十分稀有。Drout 等人[11] 使用了 MMT 望远镜的 Hectospec 光谱仪，筛选出 54 颗 M31 黄超巨星和 62 颗可能的黄超巨星，发现黄超巨星在赫罗图中的位置与演化模型一致，但没有发现质量比 25 $M_{\odot}$ 更大的恒星，与模型不符。Gordon 等人[12] 从本星系群巡天 (Local Group Galaxy Survey, LGGS) 项目和 2014 年 Humphreys 等人[113] 的研究中选取了部分黄超巨星样本，并观测得到 M31 中 113 颗黄超巨星的光谱数据以及两颗新的特超巨星 (hypergiant)。他们估计出这些巨星的初始质量，还发现超过一半的观测样本正在抛射出星周尘。

3.1.3 新星

新星是吸积伴星的白矮星发生热核反应失控的现象。自 20 世纪以来，天文学家已经在 M31 中发现了千余颗新星，其中部分新星已被低分辨率光谱观测①。新星可根据爆发次数分为只爆发过一次的经典新星 (classical novae, CNe，如 M31N 2015-01a) 和多次复发的再发新星 (recurrent novae, RNe，如 M31N 2008-12a)。M31N 2015-01a 是 2015 年 1 月在 M31 中发现的亮红新星 (luminous red novae, LRN)，对它的光谱观测为 LRN 的研究提供了珍贵的样本[119, 120]。Williams 等人[119] 和 Kurtenkov 等人[120] 对其进行光谱观测，发现 M31N 2015-01a 具有强烈 Hα 发射线且正逐渐减弱，新星的颜色也在逐渐变红。Kurtenkov 等人通过光谱的 Hα 线测得的视向速度与该处天体的旋转速度非常吻合[120]。M31N 2008-12a 是 2008 年首次爆发的快速再发新星 (rapid recurrent novae, RRNe)，是已知最快再发的 RRNe 系统，也是 Ia 型超新星前身星的候选体。从 2008 年到 2017 年，已经观测到 9 次爆发，周期为 1 a 左右。光谱证据表明其爆发是高度不对称的，可能存在正对着观测者的喷流。利用高分辨率光谱进行分析后发现，该新星不含 Ne 且 O 含量较低，系统的白矮星可能是 C-O 白矮星[121–123]。

3.2 发射线天体

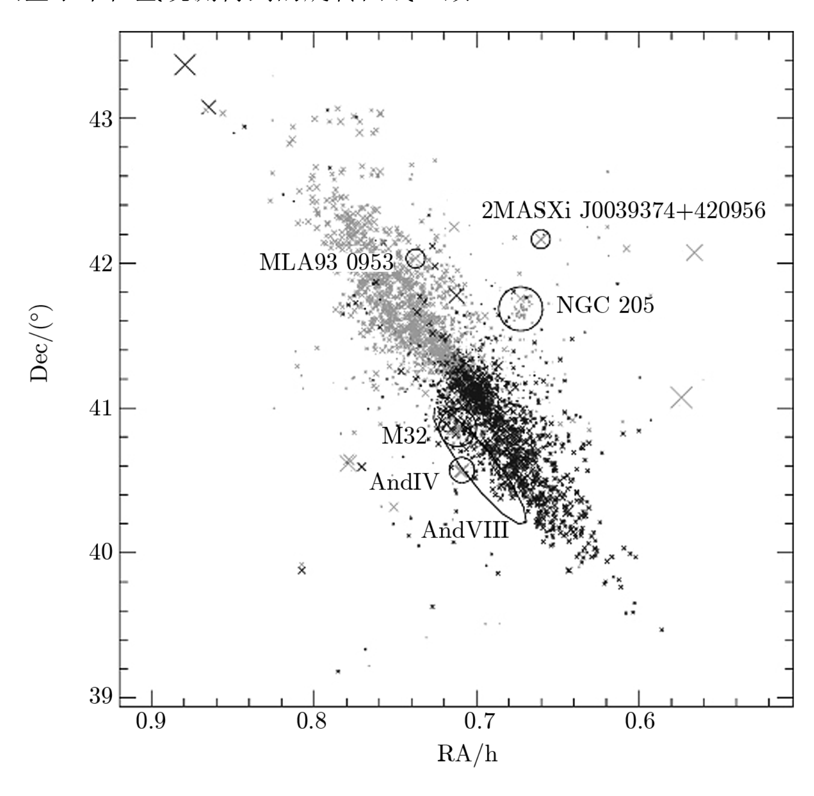
3.2.1 行星状星云

行星状星云 (PNe) 是中小质量恒星演化到末期包层气体被抛出形成的发射线星云，在星系中分布广泛，常用作研究星系动力学的探针。PNe 的光谱具有强烈的 [O III] 发射线，波长约为 5 007 Å。探测 PNe 一般先在大视场窄带 [O III] 图像中识别，再使用多目标光谱仪测量它们的速度[77–80]。Hurley-Keller 等人利用此方法研究并得到 M31 中 135 个 PNe 的运动学信息[82]，其中大部分 PNe 位于 M31 核球外部，此外有 5 个 PNe 的速度显示它们可能属于 M31 外晕中的潮汐流。

2002 年，威廉·赫歇尔望远镜启用了行星状星云光谱仪 (Planetary Nebula Spectrograph, PN.S)，可在单次光谱分析中证认 PNe 并获得其视向速度，比传统方法更高效[3, 83]。Halliday 等人[2] 发布了由 PN.S 得到的 M31 核球和盘上 723 个 PNe 的准确速度。Merrett 等人[3] 基于 PN.S 的观测，发布了包含 3 300 个发射线天体的星表，包括天体的位置、星等

① http://sunguoyou.lamost.org/m31old.html

和速度等信息，如图 3 所示。这些天体的分布区域包括半径为 1.5° 的盘，其旋转曲线在外部区域与前人基于中性氢观测得到的旋转曲线一致。



注：红色为侦测到的信号强度，黑色线为热噪音与银河盘面噪音的预期值。250 ~ 270 MHz 的连续区段为海事通讯用的射电频段。

图 3　Merrett 等人发布的 M31 中发射线天体位置[3]

由于光谱质量较高并且样本数目较大，Merrett 等人和 Halliday 等人发布的星表被广泛应用于对 M31 的天体证认、运动学和化学性质等方面研究。如被用来验证其他的发射线天体证认方法精度[84, 85]，进行 M31 质量以及暗物质分布测量；研究恒星形成演化及金属丰度分布[5, 86, 87]；研究 M31 中发射线天体本身的物理性质[88]，以及建立新的发射线天体星表[13]等。

星系的 PNe 系统除用于动力学研究以外，也可进行光度函数 (planetary nebula luminosity function, PNLF) 研究。PNLF 是测量河外星系距离的重要标准烛光之一。由于 M31 距离银河系较近，观测得到的 M31 中PNe 样本数目较大，M31 的 PNe 系统是我们研究河外星系 PNLF，尤其是函数亮端截止的优秀目标。Kwitter 等人[87]和 Galera-Rosillo 等人[5]重新观测得到了 Merrett 等人星表中的少量 PNe 的深度光谱，研究了 M31 盘上 PNLF 的亮端截止。Galera-Rosillo 等人认为 M31 PNLF 亮端截止处的 PNe 起源于 1.5 $M_{\odot}$ 左右的恒星，而 Kwitter 等人认为这个数值约为 2 $M_{\odot}$。

PNe 也是恒星演化中的重要阶段，对其进行详细的金属丰度分析有助于人们理解中

小质量恒星所经历的核合成以及挖掘混合等过程。2013 年以来，基于加那利大型望远镜 (Gran Telescopio Canarias, GTC) 的中低分辨率积分光谱和测光光学系统 (Optical System for Imaging and Low-Intermediate-Resolution Integrated Spectroscopy, OSIRIS)，天文学家陆续观测了 M31 外部共 27 个行星状星云的高质量光谱[5, 89–91]，其分辨率为 0.63 nm。基于 GTC 光谱可以测量 PNe 的详细金属丰度，Fang 等人基于这些 PNe 的金属丰度分布，认为 Northern Spur 与 GSS 可能拥有相同起源，M31 晕中 PNe 可能是在 GSS 的前身星系中形成，也可能是在 M31 外盘的富金属气体中形成后再迁移至晕中[91–93]。

3.2.2 其他发射线天体

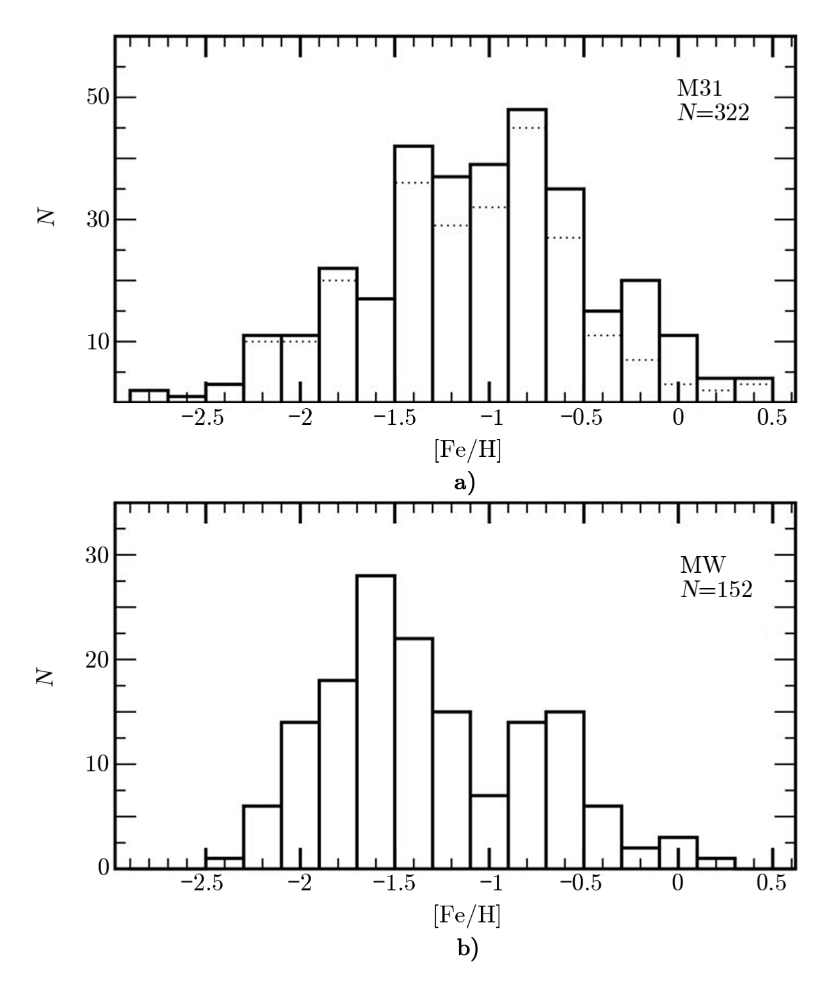
发射线天体还包含电离氢区与 SNR 等其他天体，这些天体相对于 PNe 来说数量较少，一般作为副产品随 PNe 发布于发射线天体星表。2006 年，Merrett 等人[3]发布了包含 3 300 个 M31 发射线天体的星表。2012 年，Sanders 等人[13]使用 MMT 的 Hectospec 多光纤光谱仪进行观测，得到了 M31 中 253 个电离氢区和 407 个 PNe 的光谱。2017 年，Martin 等人[94]使用 CFHT 的观测数据建立了近 800 个发射线点源的视向速度星表。Martin 等人的星表包括约 450 个新发现的发射线天体，其中有一颗新 SNR 候选体。

3.3 星团

近 20 年来，已证认得到的 M31 中星团的数量与日俱增[6, 19, 95–97]。Perrett 等人[19]利用威廉·赫歇尔望远镜的 WYFFOS 光谱仪，获得了 M31 中 200 余个 GC 的中低分辨率光谱；Galleti 等人通过一系列观测新证认出 118 个 GC[6, 95, 96]；Kim 等人[97] 获取了 748 个候选体的光谱类型和视向速度，并证认了 113 个新的 GC；Caldwell 等人使用 MMT 的 Hectospec 光谱仪观测了近 1 000 个天体的光谱，其中 670 个可能是星团[98]。此外，样本量较小的光谱观测也在逐渐增加[8, 99]。Veljanoski 等人观测了 53 个 GC 样本，并首次进行了远外晕 GC 的运动学分析[100, 101]；Fan 等人在国家天文台兴隆观测站使用 2.16 m 望远镜的 OMR 光谱仪 (Optomechanics Research Inc.) 观测了 19 个已证认 M31 GC 的光谱，并进行了运动学分析[8, 99]。星团一般分为 GC 和疏散星团，GC 是年老的大质量星团，疏散星团是年轻的小质量星团。而近年来，天文学家在银河系以及近邻星系中发现了一类质量较大且年轻的星团，命名为年轻大质量星团 (young massive cluster, YMC)[102]。Caldwell 等人[98]证认出 140 颗 M31 中的 YMC，基于光谱数据对这些 YMC 的年龄和红化进行了分析。

星系中 GC 系统的金属丰度分布反映了星系早期形成历史以及不同类型星团的来源。对 M31 中 GC 系统的光谱研究发现了 M31 中 GC 金属丰度的双峰分布没有银河系那么明显[6, 19, 99]，一些研究者认为 M31 与银河系的双峰分布不同，可能是更复杂的结构[6, 7, 103–105]。M31 与银河系的 GC 金属丰度分布对比结果如图 4 所示。Caldwell 等人[7]认为是以 [Fe/H] $= -1$ 为中心的较宽的峰，并有三个次级峰；Chen 等人[105]以及 Galleti 等人[6]认为单一高斯分布的可能性不大，同时 Galleti 等人[6]发现三峰模型拟合得更好。M31 外晕团的金属丰度梯度并不显著，对于年龄大于 7 Ga 的 GC，存在较年老的 GC 具有低金属丰度的趋势。Perrett 等人[19]发现 M31 GC 系统的平均金属丰度与银河系相似，Galleti 等人[6]认为 M31 富金属 GC 占比更大。在空间分布和运动学上，富金属 GC 的分布倾向于集中在 M31 中心，

可能是运动学上的子系统，年轻星团的速度分布与盘的旋转速度曲线符合得较好，与电离氢区的运动学也有很好的相关性，证实了年轻星团与恒星形成盘具有空间上的联系[6, 19, 98, 99]。外晕 GC 的速度弥散随投影距离减小，与晕星非常相似，可用指数 -0.5 的幂律描述[100, 101]。就金属丰度和运动学而言，M31 富金属和中等金属丰度的 GC 的旋转模式类似于 M31 的中性氢，而贫金属 GC 的速度弥散更大[6]。与银河系不同的是，M31 在其遥远外晕中存在大量非常明亮的 GC[96]。Mackey 等人发现与晕相关的 GC 群体和与子结构相关的 GC 群体具有相互垂直的旋转模式，被解释为来自两个可能相隔数十亿年的吸积时期[106]。以 GC 为探针，使用示踪质量估计等方法得到的动力学质量为 $1.2\times10^{12}\,M_\odot\sim1.6\times10^{12}\,M_\odot$[100, 101]。除中低分辨率光谱外，Sakari 和 Wallerstein[9] 及 Larsen 等人[107] 还对 M31 中 GC 进行了中高分辨率光谱观测，分别测定了 M31 中 25 个和 12 个 GC 的不同金属丰度，并与银河系以及近邻星系相比较，探索了 M31 早期的形成历史。



注：a) M31 中 322 个 GC 金属丰度分布，虚线是排除中心 2 kpc 内 GC 的分布；b) 银河系中 152 个 GC 金属丰度分布。

图 4　M31 与银河系 GC 金属丰度分布对比[7]

3.4 M31 中心与核球星族

早期的光谱观测与研究已经发现了 M31 核区的双峰结构 (P1, P2)。2001 年，Bacon 等人[124]利用光谱观测发现，M31 核区的运动轴几乎与主轴重合，但与 P1-P2 轴不重合，且沿 P1-P2 轴的速度分布不对称，从而推测核的高速运动可能与 P2 有关。2005 年，Bender 等人[125]公布了使用哈勃望远镜的成像光谱仪获得的 M31 核区的红光和蓝光光谱。他们在 P2 附近探测到微小的运动学成分 P3，其速度弥散与 P1, P2 均不一致，超大质量黑洞很可能位于其中。星族分析表明，P1 和 P2 主要是由年老的红巨星构成，P3 由年轻的 A 型主序星或巨星组成。Saglia 等人通过霍比-埃伯利望远镜 (Hobby-Eberly Telescope, HET) 的狭缝光谱数据，推断 M31 中心附近可能存在类似活动星系核的电离源，约 100 Ma 前，M31 可能发生了一次富气体的小型并合，导致短轴处气体反向旋转以及其他核活动[126, 127]。

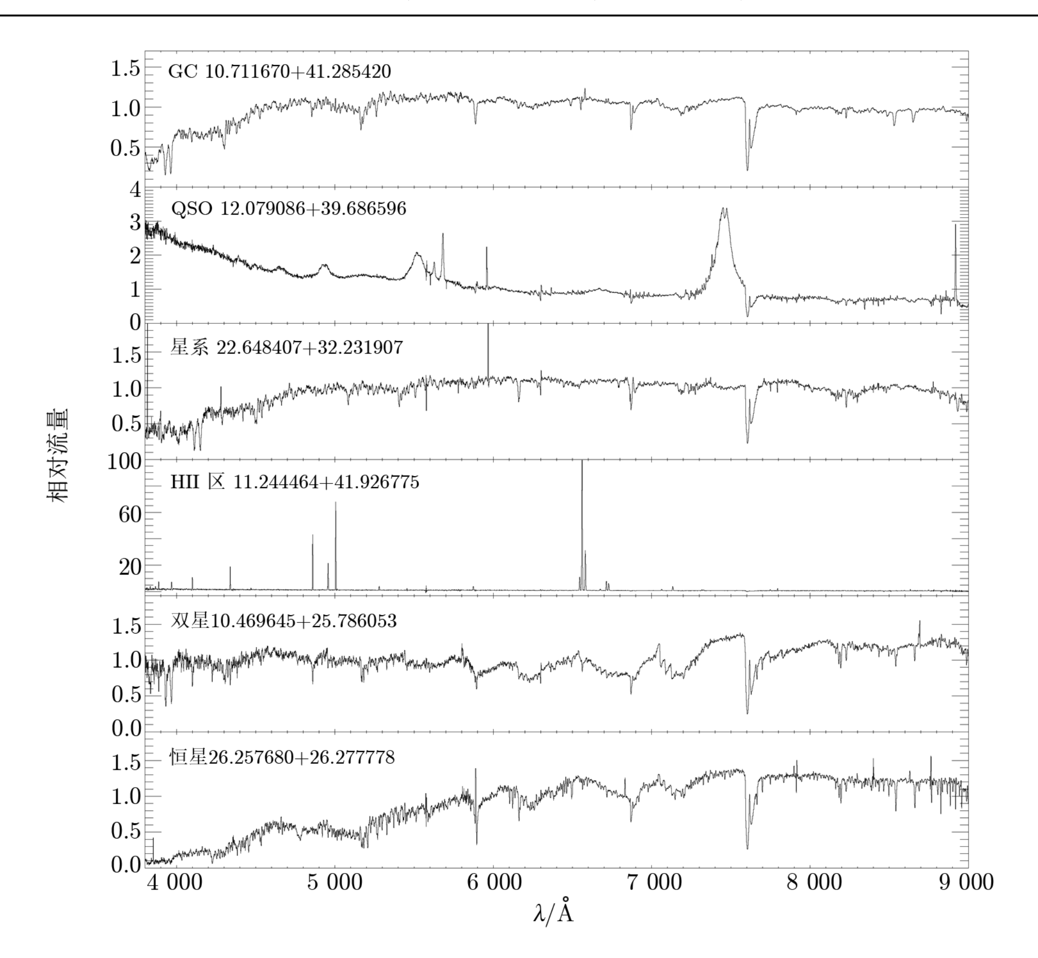
M31 的核球被认为是一个复合型核球：同时具有一个经典型核球 (classical bulge, CB) 和一个盒状花生型核球 (boxy-peanut bulge, B/P)。Saglia 等人[127]根据 Opitsch 等人[128]获得的核球星族积分光谱，推断 CB 中的大部分恒星随着原初星系盘一同形成，在更大尺度上，原初星系盘会演化为棒状，并进一步弯曲，演化为 B/P 型。Zieleniewski 等人通过帕洛玛天文台 5.08 m 望远镜的光谱观测数据，发现在 M31 核球的外部区域，星族年龄偏老 ($\geqslant$12 Ga)，金属丰度和太阳接近，存在轻微的 α 元素增丰，[Na/Fe] 的梯度约为 0.3 dex[129]。在靠近 M31 中心的区域，星族积分光谱观测发现星族年龄偏小 (4 $\sim$ 8 Ga)，金属丰度上升至 3 倍太阳金属丰度[126, 127]，Na 元素增丰的梯度约为 1.0 dex[129]。

2018 年，Li 等人[14]利用 WIYN 3.5 m 望远镜获得了 77 个位于 M31 中央约 500 pc 处的 PNe 候选体的光谱，其中有 49 个 (约占 64%) 是首次获得光谱观测结果。Li 等人通过观测得到了 M31 中心以及核球区域内 267 个 PNe 和 33 个电离氢区的光谱。计算出的视向速度揭示了内核球的旋转模式，与盘的短轴的运动学模式一致。Li 等人还得到了 M31 340 pc 内的核球质量。

4 郭守敬望远镜对 M31 天体的光谱观测与研究

前文所述的绝大部分 M31 天体光谱观测与研究工作都是基于国外望远镜的观测数据，在很长一段时间内，由于国内光学望远镜口径较小，很难对 M31 中天体进行光谱观测与研究。郭守敬望远镜 (又名大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜，LAMOST[4]) 是我国第一台天文大科学装置。LAMOST 位于兴隆观测站，是一架新型大视场 (5°) 兼大口径 (有效口径 4 m) 望远镜，可同时获得 4 000 个天体的光谱。图 5 给出 LAMOST 观测到部分类型的天体光谱。LAMOST 自 2011 年开始进入科学巡天阶段。巡天中的银河系反银心方向巡天 (LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anti-center, LSS-GAC[130]) 覆盖了 M31 和 M33 近邻天区，是我国目前唯一一个系统性对 M31 天体进行光谱观测的巡天项目。本章介绍 LAMOST 对 M31 中天体的光谱观测与研究情况。

LAMOST 极高的光谱获取效率为我们发现证认 M31 中新的天体提供了重要的帮助。



注：分别绘制了 M31 中的 GC、背景类星体、背景星系、M31 中的电离氢区、银河系的白矮星主序双星和银河系的 M 型主序星的 LAMOST 光谱。每个光谱标有天体类型和坐标 (赤经和赤纬)。

图 5　LAMOST 观测到的天体光谱示例图[132]

早在 LAMOST 调试阶段，Yuan 等人[131]就报告了 36 个观测到的 PNe 候选体，其中 17 个是新发现的。Chen 等人[132]发现证认了 M31 和 M33 中 5 个 GC 和 23 个 GC 候选体。2020 年，Zhang 等人[15]基于 LAMOST 数据发表了位于 M31 和 M33 天区的 3 305 个 Hα 发射线点源表，其中新发现 24 个 PNe 候选体，19 个电离氢区候选体，10 个 SNR 候选体和 1 个共生星候选体。Wang 等人[104] 得到了 346 个星团的年龄和金属丰度信息。Huang 等人[133]从 LAMOST 数据库中证认出 M31 中一颗新的 LBV：LAMOST J0037+4016。这颗星属于低光度 LBV，是在 M31 中发现的第 7 颗 LBV。其位置与前 6 颗不同，处于 M31 盘最外围的一个延伸子结构中，是目前发现距 M31 中心最远的一颗 LBV。

利用 LAMOST 的光谱数据，Zou 等人[20]研究了 M31 核球和盘的星族性质以及 M31 的运动学性质。他们发现 M31 中星族的视向速度弥散随距离减小，核球中的恒星在运动学上更热。对年龄研究的结果显示，M31 的核球形成于约 12 Ga 之前，盘相对年轻。星系的整

体平均金属丰度接近于太阳金属丰度，丰度梯度非常弱。Wang 等人发现 M31 的年老星团的金属丰度在 [Fe/H] $\simeq -0.6$ 和 -1.5 dex 处有两个峰值，与前人的研究一致[6, 7]；但 [Fe/H] $\simeq -1$ dex 处仍有许多星团，因此具有更复杂的结构。Chen 等人[105]基于 LAMOST 数据测量了 M31 中 305 个星团的年龄、金属丰度和质量等参数，样本中有 46 个 YMC 和 260 个 GC。这些星团的质量位于 $10^3 \sim 10^7\ M_\odot$ 之间，YMC 的金属丰度 [Fe/H] 与太阳相似，距离在 7 ~ 17 kpc 之间，GC 的金属丰度 [Fe/H] 峰值约为 0.7 dex。

5 总结与展望

随着光谱观测技术的逐渐发展，以及大型望远镜和现代光谱仪器投入使用，由光谱证认出的 M31 天体数量与日俱增。目前，我们已经获得 M31 中 5 000 多个发射线天体，包括电离氢区和 PNe 以及少量的 SNR；2 000 多个星团，其中大部分是 GC，还包括 100 多个 YMC；6 000 多颗恒星，包括 5 000 多颗红巨星以及其他巨星、OB 型星以及 100 多颗 WR 星，还发现了 7 颗 LBV；1 000 余颗新星；以及 M31 核区和盘上星族的光谱。

利用这些光谱数据，天文学家对 M31 进行了化学丰度演化分析和运动学研究。如发现 M31 的 GC 系统金属丰度略高于银河系[44, 55]，并且与银河系 GC 的金属丰度的双峰结构分布略有不同，表明 M31 和银河系星团系统的形成历史存在差异[7, 104]。M31 的晕显示弱金属丰度梯度，暗示其是由小恒星系统的吸积形成的[19, 20, 39, 42, 44, 58]。基于运动学信息，测量了 M31 的动力学质量以及质量分布。使用不同探针发现了星系不同成分的旋转差异。晕区的运动学研究发现了 M31 晕中富含运动学冷的子结构，如 GSS, Northern Spur 和 Southeast Shelf 等。

尽管对于 M31 的光谱观测已经取得了不少成果，但仍有许多特性待挖掘。展望未来，LAMOST 二期计划将青海冷湖作为新台址，相关设备也将进一步升级，极限星等可提高 2 mag，巡天规模也大大提升；计划于 2023 年升空的中国空间站工程巡天空间望远镜 (Chinese Survey Space Telescope, CSST) 计划配备无缝光谱仪，可在 GU (0.255 ~ 0.4 μm)、GV (0.4 ~ 0.6 μm) 和 GI (0.6 ~ 1.0 μm) 三个频段进行光谱观测，极限星等有望达到 22 ~ 23 mag；筹备中的宽视场巡天望远镜 (MUltiplexed Survey Telescope, MUST) 也计划进行大规模深度多目标光谱巡天。此外，国际上其他光谱巡天项目，如斯隆数字巡天项目第五期 (Sloan Digital Sky Survey-V, SDSS-V)、威廉·赫歇尔望远镜的多目标光谱仪 WEAVE (William Herschel Telescope Enhanced Area Velocity Explorer Instrument)、昴星团望远镜 (Subaru Telescope) 的主焦点光谱仪巡天 (Subaru Prime Focus Spectrograph, PSF)、CFHT的MSE (Maunakea Spectroscopic Explorer) 等都将着重对 M31 天体进行光谱观测研究；已经发射的詹姆斯·韦布空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 搭载了近红外光谱仪 (Near InfraRed Spectrograph, NIRSpec)，能够同时获得 100 个天体的光谱；计划中的 30 m 望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT)、40 m 级的欧洲极大望远镜 (European Extremely Large Telescope, E-ELT) 等的建成和观测将会大大拓展对 M31 天体

光谱观测的能力，用以研究 M31 的样本会更加趋于完备。天文学家们正期待着更清晰更准确地呈现 M31 的各种细节特征，以更好地理解旋涡星系的形成和演化。

参考文献：

[1] Reitzel D B, Guhathakurta P. ASP, 1998, 136: 30
[2] Halliday C, Carter D, Bridges T J, et al. MNRAS, 2006, 369: 97
[3] Merrett H R, Merrifield M R, Douglas N G, et al. RAS, 2006, 369: 120
[4] Cui X, Zhao Y, Chu Y, et al. RAA, 2012, 12: 1197
[5] Galera-Rosillo R, Mampaso A, Corradi R L M, et al. A&A, 2021, 657: 71
[6] Galleti S, Bellazzini M, Buzzoni A, et al. A&A, 2009, 508: 1285
[7] Caldwell N, Schiavon R, Morrison H, et al. AJ, 2011, 141: 61
[8] Fan Z, Huang Y, Li J, et al. RAA, 2011, 11: 1298
[9] Sakari C, Wallerstein G. MNRAS, 2016, 456: 831
[10] Cordiner M A, Cox N L J, Trundle C, et al. A&A, 2008, 480: L13
[11] Drout M R, Massey P, Meynet G, et al. ApJ, 2009, 703: 441
[12] Gordon M, Humphreys R, Jones T, et al. ApJ, 2016, 825: 50
[13] Sanders N E, Caldwell N, McDowell J, et al. ApJ, 2012, 758: 133
[14] Li A, Li Z, Dong H, et al. RAA, 2018, 18: 140
[15] Zhang M, Chen B, Huo Z, et al. RAA, 2020, 20: 97
[16] Gilbert K M, Font A S, Johnston K V et al. ApJ, 2009, 701: 776
[17] Dorman C E, Guhathakurta P, Fardal M A, et al. ApJ, 2012, 752: 147
[18] Gilbert K M, Kalirai J S, Guhathakurta P, et al. ApJ, 2014, 796: 76
[19] Perrett K, Bridges T, Hanes D. IAUS, 2002, 207: 52
[20] Zou H, Yang Y, Zhang T, et al. RAA, 2011, 11: 1093
[21] McConnachie A W, Irwin M J, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2005, 356: 979
[22] Humphreys R M. ApJ, 1979, 234: 854
[23] Baade W, Swope H H. AJ, 1963, 68: 435
[24] Humphreys R M, Pennington R L, Jones T J, et al. AJ, 1988, 96: 1844
[25] Hutchings J B, Bianchi L, Lamers H J G L M, et al. ApJ, 1992, 400: L35
[26] Massey P. ApJ, 1998, 501: 153
[27] Moffat A F J, Shara M M. ApJ, 1983, 273: 554
[28] Moffat A F J, Shara M M. ApJ, 1987, 320: 266
[29] Massey P, Armandroff T E, Conti P S. AJ, 1986, 92: 1303
[30] Schild H, Smith L J, Willis A J. A&A, 1990, 237: 169
[31] Willis A J, Schild H, Smith L J. A&A, 1992, 261: 419
[32] Greiner J, Tovmassian G, Komossa S, et al. A&A, 1999, 347: 556
[33] Massey P, Conti P S, Armandroff T E. AJ, 1987, 94: 1538
[34] Meyssonnier N, Lequeux J, Azzopardi M. A&A, 1993, 102: 251
[35] Barmby P, Huchra J P, Brodie J P, et al. AJ, 2000, 119: 727
[36] Crampton D, Cowley A P, Schade D, et al. ApJ, 1985, 288: 494
[37] van den Bergh S. ApJs, 1969, 19: 145
[38] Hartwick F D A, Sargent W L W. ApJ, 1974, 190: 283
[39] Federici L, Pecci F F, Marano B, et. al. A&A, 1990, 236: 99
[40] Sargent W, Kowal C, Hartwick F, et al. AJ, 1977, 82: 947s
[41] Battistini P, Bonoli F, Braccesi A, et al. A&A, 1987, 67: 447

[42] Federici L, Bonoli F, Ciotti L, et al. A&A, 1993, 274: 87
[43] Huchra J, Stauffer J, Speybroeck L, et al. ApJ, 1982, 259: L57
[44] Huchra J, Brodie J, Kent S. ApJ, 1991, 370: 495
[45] Babcock H W, Lic O B. Lick Observatory Bulletin, 1939, 19: 41
[46] Rubin V C, Ford W K. ApJ, 1970, 150: 379
[47] Roberts M S, Whitehurst R N. ApJ, 1975, 201: 327
[48] Kent S M. ASP, 1989, 489: 493
[49] Lauer T R, Faber S M, Groth E J. AJ, 1993, 106: 1436
[50] Emsellem E, Combes F. A&A, 1997, 323: 674
[51] Tremaine S. AJ, 1995, 110: 628
[52] Bacon R, Emsellem E, Monnet G, et al. A&A, 1994, 281: 691
[53] Statler T S, King I R, Grane P, et al. AJ, 1999, 117: 894
[54] Kormendy J, Bender R. ApJ, 1999, 522: 772
[55] Reitzel D B, Guhathakurta P, Gould A. AJ, 1998, 116: 707
[56] Guhathakurta P, Reitzel D B. ASPF, 1998, 136: 22
[57] Guhathakurta P, Reitzel D, Grebel E. SPIE, 2000, 4005: 168
[58] Reitzel D B, Guhathakurta P. AJ, 2002, 124: 234
[59] Reitzel D B, Guhathakurta P, Rich R M. AJ, 2004, 127: 2133
[60] Gilbert M. Galaxies, 2017, 5: 59
[61] Guhathakurta P, Rich R M, Reitzel D B, et al. AJ, 2006, 131: 2497
[62] Kalirai J S, Zucker D, Guhathakurta P, et al. ApJ, 2009, 705: 1043
[63] Kalirai J S, Beaton R, Geha M, et al. ApJ, 2010, 711: 671
[64] Kalirai J, Beaton R, Majewski S, et al. Science, 2011, 48: 329
[65] Tollerud E, Beaton R, Geha M, et al. ApJ, 2012, 752: 45
[66] Ibata R, Irwin M, Lewis G, et al. Nature, 2001, 412: 49
[67] Kalirai J S, Gilbert K M, Guhathakurta P, et al. ApJ, 2006, 648: 389
[68] Gilbert K M, Guhathakurta P, Kalirai J S, et al. ApJ, 2006, 652: 1188
[69] Collins M L M, Chapman S C, Ibata R A, et al. MNRAS, 2011, 413: 1548
[70] Gilbert K M, Guhathakurta P, Beaton R L, et al. ApJ, 2012, 760: 76
[71] Gilbert K M, Tollerud E, Beaton R L, et al. ApJ, 2018, 852: 128
[72] Kalirai J S, Guhathakurta P, Gilbert K M, et al. ApJ, 2006, 641: 268
[73] Ibata R, Chapman S, Ferguson A, et al. ApJ, 2005, 634: 287
[74] McConnachie A, Irwin M, Lewis G, et al. MNRAS, 2004, 351: L94
[75] Gilbert K M, Fardal M, Kalirai J S, et al. ApJ, 2007, 668: 245
[76] Ibata R, Chapman S, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2004, 351: 117
[77] Arnaboldi M, Freeman K C, Mendez R H. ApJ, 1996, 472: 145
[78] Arnaboldi M, Freeman K C, Gerhard O. ApJ, 1998, 507: 759
[79] Hui X, Ford H C, Freeman K C, et al. ApJ, 1995, 449: 592
[80] Peng E W, Ford H C, Freeman K C. ApJ, 2004, 602: 685
[81] Mendez R H, Riffeser A, Kudritzki R P, et al. ApJ, 2001, 563: 135
[82] Hurley-Keller D, Morrison H L, Harding P. ApJ, 2004, 616: 804
[83] Douglas N G, Arnaboldi M, Freeman K C, et al. PASP, 2002, 114: 1234
[84] Kniazev A Y, Grebel E K, Zucker D B, et al. AJ, 2014, 147: 16
[85] Azimlu M, Marciniak R, Barmby P. AJ, 2011, 142: 139
[86] Davidge T J, McConnachie A W, Fardal M A, et al. ApJ, 2012, 751: 74
[87] Kwitter K B, Lehman E M M, Balick B, et al. ApJ, 2012, 753: 12
[88] Richer M G, McCall M L. ApJ, 2008, 684: 1190
[89] Balick B, Kwitter K, Corradi R, et al. ApJ, 2013, 774: 3
[90] Corradi R L M, Kwitter K B, Balick B, et al. ApJ, 2015, 807: 181

[91] Fang X, Garcia-Benito R, Guerrero A, et al. ApJ, 2015, 815: 69
[92] Fang X, Zhang Y, Garcia-Benito R, et al. ApJ, 2013, 774: 138
[93] Fang X, García-Benito R, Guerrero M A, et al. ApJ, 2018, 853: 50
[94] Martin T B, Drissen L, Melchior A. MNRAS, 2017, 473: 4130
[95] Galleti S, Federici L, Bellazzini M, et al. A&A, 2006, 456: 985
[96] Galleti S, Bellazzini M, Federici L, et al. A&A, 2007, 471: 127
[97] Kim S C, Lee M G, Geisler D, et al. AJ, 2007, 134: 706
[98] Caldwell N, Harding P, Morrison H, et al. AJ, 2009, 137: 94
[99] Fan Z, Huang Y, Li J, et al. RAA, 2012, 12: 829
[100] Veljanoski J, Ferguson A M N, Mackey A D,et al. ApJ, 2013, 768: 33
[101] Veljanoski J, Mackey A D, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2014, 442: 2929
[102] Vansevičius V, Kodaira K, Narbutis D, et al. ApJ, 2009, 703: 1872
[103] Kim S, Yoon S J, Chung C, et al. ApJ, 2013, 768: 138
[104] Wang S, Chen B, Ma J. A&A, 2021, 645: 115
[105] Chen B, Liu X, Xiang M, et al. AJ, 2016, 152: 45
[106] Mackey D, Lewis G F, Brewer B J, et al. Nature, 2019, 574: 69
[107] Larsen S S, Eitner P, Magg E, et al. A&A, 2021, 660: A88
[108] Massey P, McNeill R, Olsen K, et al. AJ, 2007, 134: 2474
[109] Massey P, Neugent K, Smart B, et al. AJ, 2016, 152: 62
[110] Sarkisyan A, Sholukhova O, Fabrika S, et al. MNRAS, 2020, 497: 687
[111] Sarkisyan A, Sholukhova O, Fabrika S, et al. A&A, 2022, 22: 5022
[112] Humphreys R M, Davidson K, Grammer S, et al. ApJ, 2013, 773: 4
[113] Humphreys R M, Weis K, Davidson K, et al. ApJ, 2014, 790: 48
[114] Humphreys R M, Gordon M S, Martin J C, et al. ApJ, 2017, 836: 64
[115] Smartt S J, Crowther P A, Dufton P L, et al. MNRAS, 2001, 325: 257
[116] Neugent K F, Massey P, Georgy C. ApJ, 2012, 759: 11
[117] Sander A, Todt H, Hainich R. A&A, 2014, 563: A89
[118] Shara M M, Mikolajewska J, Caldwell N, et al. MNRAS, 2016, 455: 3453
[119] Williams S, Darnley M, Bode M, et al. ApJL, 2015, 805: L18
[120] Kurtenkov A A, Pessev P, Tomov T, et al. A&A, 2015, 578: L10
[121] Darnley M J, Williams S C, Bode M F, et al. A&A, 2014, 563: L9
[122] Darnley M J, Henze M, Steele I A, et al. A&A, 2015, 580: A45
[123] Darnley M J, Hounsell R, Godon P, et al. ApJ, 2017, 847: 35
[124] Bacon R, Emsellem E, Combes F, et al. A&A, 2001, 371: 409
[125] Bender R, Kormendy J, Bower G, et al. ApJ, 2005, 631: 280
[126] Saglia R P, Fabricius M, Bender R, et al. A&A, 2010, 509: A61
[127] Saglia R P, Opitsch M, Fabricius M H, et al. A&A, 2018, 618: 156
[128] Opitsch M, Fabricius M H, Saglia R P, et al. A&A, 2018, 611: 38
[129] Zieleniewski S, Houghton R, Thatte N, et al. MNRAS, 2015, 452: 597
[130] Liu X, Yuan H, Huo Z et al. IAUS, 2014, 298: 310
[131] Yuan H, Liu X, Huo Z, et al. RAA, 2010, 10: 599
[132] Chen B, Liu X, Xiang M, et al. RAA, 2015, 15: 1392
[133] Huang Y, Zhang H, Wang C, et al. ApJL, 2019, 884: L7

Spectroscopic Observation and Research of Objects in M31

ZHANG Xiang-wei[1], SUN Jia-rui[1], CHEN Pin-jian[1], CHEN Bing-qiu[2]

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. South-Western Institute for Astronomy Research, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: The Andromeda Galaxy (M31) is the nearest large spiral galaxy to us. It has a similar structure and mass to our Milky Way. The observation and study of the M31 objects can help us understand the formation and evolution history of galaxies. In this paper, we have sorted out the spectroscopic observations of the sources in M31 and the related scientific research results since the last century. We have obtained spectra of more than 5 000 emission line objects (including H II regions, planetary nebulae and supernova remnants), more than 2 000 star clusters (including globular clusters and young massive clusters), more than 6 000 stars (including various variable stars, giant stars, OB-type stars and Wolf-Rayet stars), more than 1 000 novae, as well as the individual stellar populations of the M31 bulge and disk. The spectroscopic observing targets of M31 stars are mainly super giants in the early stage. In recent 20 years, we are then able to obtain spectra of M31 stars of more types and larger samples, among which the spectra of red giants are obtained to study the properties and (sub)structure of the M31 disk and halo. Objects with emission lines in M31 are usually adopted to estimate the mass, to obtain the kinematic properties and to study the stellar evolution in M31. The spectra of the M31 star clusters are used to determine their metallicities and kinematic properties, as well as to measure the virial mass of M31. The stellar populations in the M31 center nuclear region are used to study their population properties and kinematics properties. Finally, we have introduced the spectral observations and the related scientific studies of the M31 objects by LAMOST.

Key words: spectroscopic observations; M31(Andromeda); kinematics and dynamics; metallicity; stellar population